

# 確率的構成モデルに基づく海洋植物群の成長パターンとその挙動

古川 正志 小川 純 山本 雅人  
渡辺美知子 澤井 秀  
北海道情報大学

Growth Patterns of Sea-plant Populations and Their Motion  
Analysis for Based on Stochastic Architectural Model

Masashi FURUKAWA, Jun OGAWA, Masahito YAMAMOTO  
Michiko WATANABE and Suguru SAWAI  
Hokkaido Information University

平成27年11月

北海道情報大学紀要 第27巻 第1号別刷

## 〈論文〉

## 確率的構成モデルに基づく海洋植物群の 成長パターンとその挙動

古川正志\* 小川純† 山本雅人‡ 渡辺美知子§ 澤井秀\*

### Growth Patterns of Sea-plant Populations and Their Motion Analysis for Based on Stochastic Architectural Model

Masashi FURUKAWA\* Jun Ogawa † Masahito YAMAMOTO ‡  
Michiko WATANABE § Suguru SAWAI\*

#### 要旨

本研究では、最初に、確率モデルを用いた植物群の動的成長パターンの生成法を新たに提案する。次いで、成長にともなう植物の形状から海藻の物理モデル作成し、一定の流れをもつ水中環境下において、物理シミュレーションを用いて、異なる成長段階における浮遊性植物群の挙動を調査した。その結果、提案モデルは、海藻の成長パターンを表現可能であり、このモデルから海藻の成長段階により絡みが異なることが検証された。

#### Abstract

This paper proposes a simulation method of movement of marine plants in a water flow at the different growth process. The dynamic growth patterns of marine plants are realized by adopting a stochastic growth mode, which takes into account physical interference among plant populations. The physics engine (PhysX offered by NVIDIA) is employed to simulate plant movement. It is clarified that physical factors make a great effect on marine plant population.

#### キーワード

バイオマス海藻 物理モデリング 水流シミュレーション 人工生命

\*北海道情報大学経営情報学部システム情報学科教授, Professor, Department of Business and Information Systems (Dept. of BIS), HIU

†北海道大学情報科学研究科学術研究員, Post-Doctorial Researcher, Department of Information Science and Technology (Dept. of IST), Hokkaido University (HU)

‡北海道大学情報科学研究科教授, Professor, Dept. of IST, HU

§北見工業大学機械工学科准教授, Associate Professor, Department of Kitami Institute of Technology

## 1 緒 言

近年、エネルギー生産や食糧生産の分野で海洋植物の培養が注目されており、世界各国で研究が進められている「DEIRBAS *et al.* (2009)」。海洋植物は優れた効率の光合成により成長が可能である。その光合成は、温室効果ガスである  $\text{CO}_2$  や  $\text{NO}_2$  などを吸収し、その量に応じた酸素や糖を生産する特徴を備えている。そのため、海洋植物の培養に関する研究は工学的に重要な価値がある。この特徴は、大規模培養な海洋植物を利用した火力発電所における  $\text{CO}_2$  回収「KHESHGI H.S. *et al.* (2000)」や抽出されるバイオオイルの自動車燃料としての導入「渡邊信 (2010)」などに導入され、多くの実用例も報告されている。

海洋植物の培養では浮遊性植物群の高密度培養が主流である「MATSUMOTO M. *et al.* (2000)」。浮遊性植物とは根を固定せず、水中を水流に応じて自由に浮遊する植物である。この植物は流動によって効率よく  $\text{CO}_2$  と光を光合成器官に蓄積・吸収できるため、非常に早い成長速度が実現できることが、実験(図1)で確認されている「竹中工務店 (2012)」。

しかしながら、浮遊性植物は高密度培養時において、絡みや絡みによるちぎれを防ぐ水流の制御を必要とする問題が存在する。すなわち、成長初期の段階では茎と葉が短いため他個体の物理的干渉が少ないが、成長が進むにつれて、その干渉度合いが大きくなり、絡みなどの物理現象が生じ、成長が阻害される。このため効率的な培養を目指す上で、成長段階に応じた浮遊性植物群の挙動解析とそれに伴った水流の制御が必要となる。

本研究では、環境及び複数の海洋植物間の物理的干渉を考慮した確率的成長モデルによる植物群の形状モデリング方法を

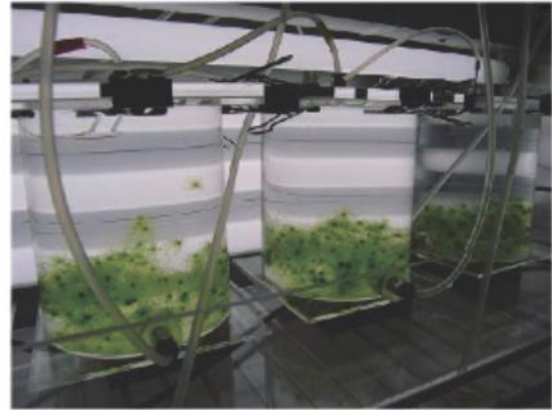


図1 ミナミアオノリの培養実験(竹中工務店(株))  
「平成24年度二酸化炭素海洋固定化・有効利用技術調査事業報告書」, p78 図9より引用)

提案し、得られる形状を利用して成長段階の異なる植物群の物理モデルを作成する。これによって仮想空間内に定義した水中環境において植物群を配置し、水流の時系列変化により得られる物理シミュレーションを実施し、その結果に基づき海洋植物群の物理的影響について検証する。シミュレーションには物理エンジンを使用する。物理エンジンとは、仮想空間に配置された剛体のダイナミクスを高速に計算し、摩擦、落下、衝突、弾みなどの物理的反応を容易にシミュレーション可能なソフトウェアライブラリである。

本論文の構成は次の通りである。2章で関連する植物の形状モデリングについて述べる。3章では、本研究で使用する植物群の確率的成長モデルとその環境モデルを物理モデリングに基づいての方法を提案する。3章で植物と水中環境の物理モデリングについて説明し、4章で異なる成長段階に応じた浮遊性植物群の挙動のシミュレーション実験の方法及び目的を示し、その結果と考察について述べる。5章で結論を述べる。

## 2. 関連する植物群の成長モデル

ここでは、植物の形態をモデル化する関

述する植物群の成長モデルを、簡単に述べる。

### 2-1 リンデンマイヤモデル (L-システム)

計算機を用いて植物の成長を表現する方法は、フィボナッチ法やフラクタルを用いる方法が古くから存在する。しかし、最も知られる代表的な方法として 1968 年にハンガリーの植物学者アリストテッド・リンデンマイヤー等によって提唱された L-system 「PRUSINKIEWICZ P. and LINDENMAYER A. (1991)」がある。

L-system は、セルラーオートマトンを自然界の植物の構造決定プロセスに適用したものである。自然界の植物の基本構造要素であるプリミティブは、あらかじめ文字で表現され、構造決定のプロセスは設定した置換規則をプリミティブに再帰的に適用し、徐々に植物の成長を表現するアルゴリズムである。

L-system の適用によって容易に植物の成長を表現することが可能となり、遺伝的操作による自然淘汰や物理的影響などを考慮した Genetic L-system Programming (GLP) 「JACOB C. (1994)」や Physics Enhanced L-system 「JACOB C. (1994)」等の改良手法も提案されている。しかしながら、これらの再帰的手法は成長ステップごとに構造がすべて上書きされるため、成長が進んだ際に以前の構造情報を維持することができず、表現される形状が規則的になりがちな欠点がある。

### 2-2 確率的植物成長モデル

再帰的なアルゴリズムを用いず、構成モデル (architectural model) として植物の成長過程を表現する方法も古くから存在する 「HALEE F. *et al.* (1978)」「FISHER J. (1992)」。構成モデルを発展させた方法として、確率的植物成長モデル 「KANG M.Z. *et al.* (2008)」がある。確率的成長モデルとは茎葉の伸長や分枝・曲折などを確率的

に選択し、成長状態を表現するモデルである。構造決定は前の情報に追加する形で行われるため、成長ステップごとに生じる重複部分の上書きがなくなり、無駄が少ない成長表現が可能となる。

## 3. 確率的成長モデルに基づく植物群の表現

### 3-1 構成モデル

本研究で用いる確率的成長モデルは、構成モデルを簡略化したものである。構成モデルは、植物の頂芽 (apical bud) の成長方向で茎となる主軸 (main axis) と、主軸から生じる側芽 (lateral bud) の成長方向で茎となる側軸 (lateral axis, bearing axis) によってトポロジカルな構造を表現する。生成された主軸と側軸は、新たに主軸と側軸を生成する。この生成を 1 成長サイクル (chronological age) と呼ぶ。植物の構造は、成長サイクルを繰り返したときの主軸及び側軸の結合により表現する。主軸及び副軸の成長サイクル数にはそれぞれ上限を設定し、これを限界サイクル数 (physiological age, PA) と呼ぶ。「KANG M.Z. *et al.* (2008)」に基づく簡単な例によって構成モデルを図 2 に従って説明する。

構成モデルは、芽の活動によって作成される。芽は同種類の成長ユニットを作り出す。成長ユニットは一つの頂芽と一つ以上のメタマーを内包する。メタマーは化学では異性体と訳されるが、ここでは新しい側芽と茎となる植物の部分構造に成長するものを指す。頂芽、成長ユニット、側芽、メタマー、及び茎の関係を表 1 に示す。

図 2-(a) は、3 種類の芽 (種) であり、図 2-(b) はそこから発展した頂芽とメタマーである。メタマーの種類を区別するために限界サイクル数  $PA$  を用いる。限界サイクル数によって区別された  $PA$  を  $PA_p$  と記述する。図 3 では、 $PA_1$ 、 $PA_2$ 、 $PA_3$  の

表 1 構成モデルの要素と生成要素

要素	生成要素
頂芽	成長ユニット
成長ユニット	頂芽, メタマー, 茎
メタマー	側芽, 茎
側芽	頂芽, メタマー, 茎

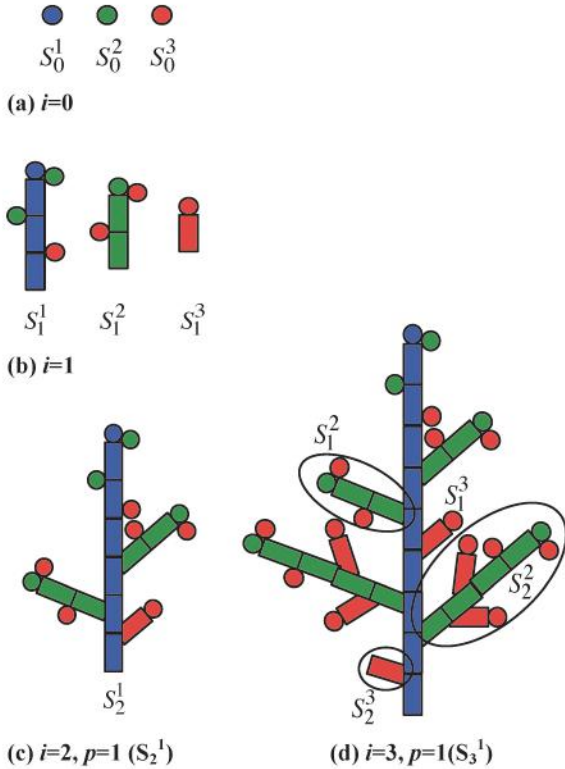


図 2 構造的モデルの成長遷移

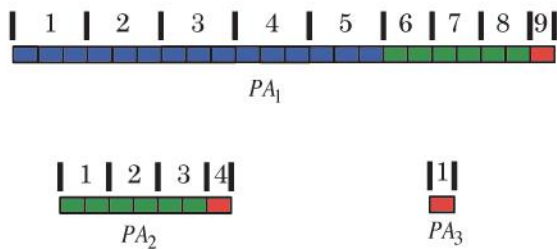


図 3 (3)式による変化前の限界サイクル数による軸の成長

限界サイクル数を 3, 2 及び 1 と設定している. 現在のサイクル数が  $i$  の時の  $PA_p$  のメタマーの構造を  $\{S_i^p\} = \{S_i^1, S_i^2, S_i^3\}$  と記述する.  $\{S_0^p\} = \{S_0^1, S_0^2, S_0^3\}$  は, メタマーの成長前の芽 (種子) とする.

サイクル数  $i$  の時に, 成長ユニットがそ

の内包するメタマーを生成する個数を, 行列  $M_I = [M_I^{p,k}]$  で表現する. 図 2 では,

$$[M_I^{p,k}] = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

を用いる. すなわち,  $p=1$  では  $p=2$  のメタマーを 2,  $p=3$  のメタマーを 1 生成する. 同様に,  $p=2$  では  $p=3$  のメタマーのみを 2 生成し,  $p=3$  では  $p=3$  のメタマーのみを 1 生成する.

また,  $PA_p$  がサイクル数  $i$  の時に, 1 メタマーが生成する側芽の個数を  $N_B = [N_B^{p,k}]$  で表現する. 図 2 では,

$$[N_B^{p,k}] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

と設定した. すなわち,  $p=1$  では  $p=2$  の側芽を 1,  $p=3$  の側芽を 1 生成する. 同様に,  $p=2$  では  $p=3$  の側芽のみを 1 生成し,  $p=3$  では側芽を生成しない.

(1)及び(2)式に従って成長を繰り返すと図 2 (a)~(d)のようになる.

軸が成長した時, 頂芽はあるサイクル数  $i$  で, 限界サイクル数を変えることができる. 変化前のサイクル数をベクトル  $M_A$  で定義する. また, 変化後の頂芽の新しい限界サイクル数  $PA$  をベクトル  $T_a$  とする.

例えば,

$$M_A = [ 5 \ 3 \ 1 ] \quad (3)$$

$$T_A = [ 2 \ 3 \ 0 ] \quad (4)$$

と定義すると, 変化前の頂芽の限界サイクル数の  $PA_1$ ,  $PA_2$ , 及び  $PA_3$  は図 3 のようになる.



図4 ミナミアオノリの成長(竹中工務店(株)「平成24年度二酸化炭素海洋固定化・有効利用技術調査事業報告書」, p76 図5より引用)

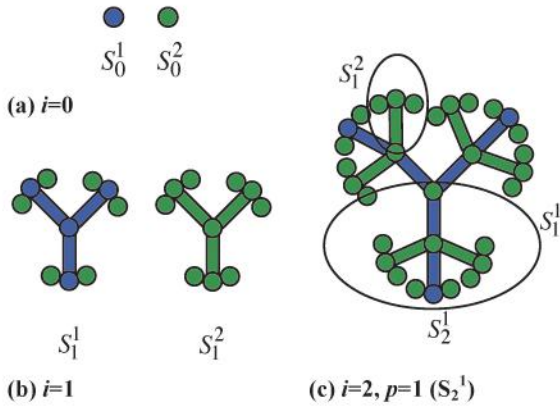


図5 ミナミアオノリの構造的モデルの成長遷移

### 3-2 確率的構成モデル

昆虫による被害などと物理的な環境制約から、成長ユニットの芽は成長、休止、枯れ死等を起こす。また、自身の交差による成長の休止も引き起こされる。これを実現するために構成モデルに要素数  $p_m$  の確率ベクトル  $P$  を導入し、芽、側芽、メタマーの生成を確率的にする。

頂芽の生存確率:  $P_C$  を頂芽の生存確率とする。芽の生存個数は  $P_C M_A$  で計算される。

側芽の分岐確率:  $P_B$  を側芽の分岐確率とする。側芽の分岐の個数  $P_B N_B$  で計算される。

頂芽の成長確率:  $P_A$  を頂芽が生存しても成長を休止する(未生育となる)確率とする。頂芽の休止個数は  $P_A M_A$  で計算される。

メタマーの出現確率:  $P_I$  を成長ユニットからメタマーが出現する確率とする。メタマーの個数は、 $P_I M_I$  で計算される。

これらの確率を構成モデルに導入することにより、より現実に近い植物のモデル化を行なうことができる。

### 3-3 海藻の成長モデル

一般的な陸上植物モデルの多くは、前節で述べた確率的構成モデルによりモデル化できる。ここでは、海藻培養植物として知られる図4に示したミナミアオノリ (*ulva meridionalis*, green laver)「竹中工務店(株)(2012)」を海藻の成長モデルとして作成する。

ミナミアオノリは、水中に浮遊するために根を持たない。その成長の形状は筋状であり茎に側芽を持たない。水中で浮遊するため重力の影響を受けず、複数の主軸を生成する。頂芽は、いくつかの方位に確率的に複数の成長ユニットを生成する。成長ユニットはメタマーを生成するが、側芽は頂芽と同じ位置に生成される。限界サイクル数が3の時のサイクル数2迄の成長を図5に示す。

サイクル数  $i$  の時に、成長ユニットがその内包するメタマーを生成する個数の行列  $M_i$  は、

$$[M_i^{P,k}] = \begin{bmatrix} 0 & n \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

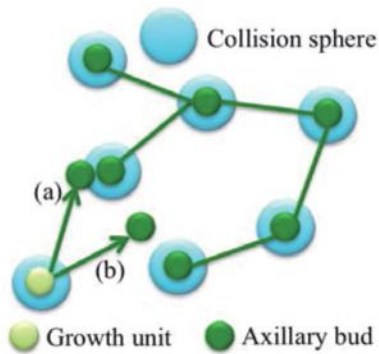
となる。ここで、 $n$  はメタマーの数である。また、サイクル数  $i$  の時に、1メタマーが生成する側芽の個数の行列  $M_i$  は、

$$[N_B^{P,k}] = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

となる。

確率モデルとしては、メタマーの出現確率と側芽の分岐確率を導入する。成長ユニットからのメタマーの出現個数は、 $P_A M_A$  で計算される。また、側芽の分岐個数は  $P_I M_I$  となる。

図5-(b)から分かるように、 $S_1^1$  と  $S_1^2$  は同じトポロジーを持つので、特に頂芽と側



(a) 他の側芽と干渉のため生成できない側芽  
(b) (a)を回避して生成した側芽

図 6 干渉回避した側芽の生成

芽を区別しなければ, (5)式は

$$\begin{bmatrix} M_{l,k}^{p,k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & n+1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

と変更できる. 従って, 以下のような海藻の生成モデルを作成できる.

- 1) 種子から確率  $P_l$  で成長ユニットを作る ( $i=0$ ).
- 2)  $i=i+1$  として, 成長ユニットから確率  $P_l$  でメタマーを作成する. 確率  $(1-P_l)$  で成長ユニットはメタマーを生成しない.
- 3) 生成したメタマーから, 茎と側芽を生成する. 側芽の位置ベクトルを茎の長さ  $l$ , 成長ユニットからのロール角  $\varphi$ , ピッチ角  $\theta$ , ヨー角  $\psi$  で表した伸長度  $G(l, \varphi, \theta, \psi)$  で定義する. 伸長度の各要素にはあらかじめ設定した値域が与え, 乱数により決定する.
- 4)  $i=p_{max}$  (最大限界サイクル数) ならば, 終了する. そうでなければ, 2)へ戻る.

### 3-3 植物間の干渉回避

海藻が成長すると, モデル上では伸びた茎が他個体の茎と接触し干渉を起こし, その方向に茎を伸ばすことができなくなる. しかし, 実際の海藻の成長では密集状態でもある程度滞ることなく, 自然に枝を伸ば

せる空間を探索し成長する. 密集状態あるいは成長が進んだ状態では, 特にこのような物理的な要因が海藻の成長に与える影響が大きくなる. そのため, 海藻自身が自身の茎を他個体と接触せず伸ばす方向を確率的に選択する必要がある.

ここでは, CAD で使用される簡単な衝突 (干渉) 回避の方法を以下のように導入する.

- 1) メタマーから生成された側芽にそれを完全に包含する立体球を定義する. この立体球を海藻の干渉領域とよぶ.
- 2) 前節のステップ 3)で生成されるメタマーから生成される新しい側芽の位置ベクトルが, 自身あるいは他の海藻の側芽の干渉領域内であれば, 再度, メタマーは  $G(l, \varphi, \theta, \psi)$  の要素  $\varphi, \theta, \psi$  を変更し, 新しい茎と側芽を生成する.
- 3) もし新しい側芽がどの側芽の干渉領域にも含まれないならば, これをメタマーの生成する側芽と茎の位置とし, 1)へ戻る. そうでなければ 2)へ戻る.

干渉回避の概念を図 6 に示す.

### 3-5 環境の影響の考慮

実際の環境では  $\text{CO}_2$  濃度や光の強度にばらつきが生じており, 植物の生息地点によってその成長度合いにばらつきが生じる. このような環境が成長に与える影響を考慮するために, 図 7 に示すように環境を領域分割し領域ごとの影響度  $e$  を実数値として与えた. 対象となる成長ユニットは, 成長ユニットが存在する領域の影響度と, 乱数で決定した伸長度の長さ値の積を計算し, 新たに生成される側芽の位置ベクトルの伸長の長さとして置き換える. これにより環境の影響を考慮する. 3-3 から 3-5 に基づいて生成した最大限界サイクル数 5 の海藻モデルの例を図 8 に示す.

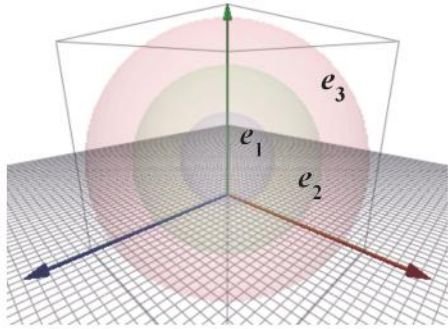


図7 環境係数の設定 (外側程, 成長が大きい)

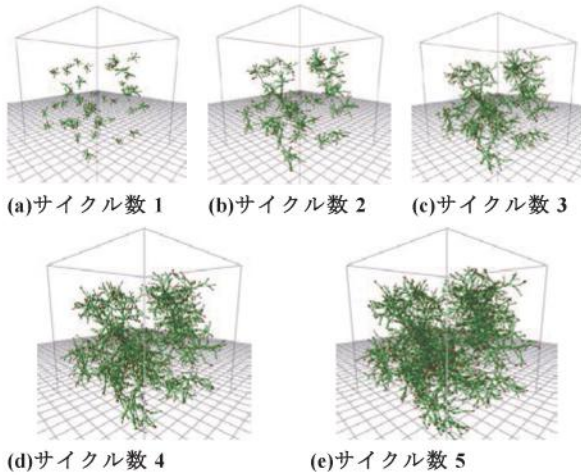


図8 生成された海藻モデル例

## 4 植物と環境の物理モデリング

### 4-1 海藻の物理モデル

海藻の確率的成長モデルにより動的に生成される海藻の成長パターン(図7)から剛体を用いて現実の物理法則に従う海藻の物理モデルの作成方法を述べる。

最初に, 海藻のメタマー(側芽)の位置に剛体球を配置し, メタマーと生成する側芽の位置ベクトルに基づいて, その直線上に球状の剛体とジョイントを配し, 海藻の茎部分を作成する。更に, 海藻の弾性体としての物理性質を付加しモデル化するために減衰係数とばね係数をジョイントに設定する。ジョイントは,  $x$  軸,  $y$  軸,  $z$  軸周りに回転可能なように軸廻りに3自由度で設定し, 海藻の柔軟性を実現する。

### 4-2 物理性質

本研究で用いる物理エンジン PhysX 「N

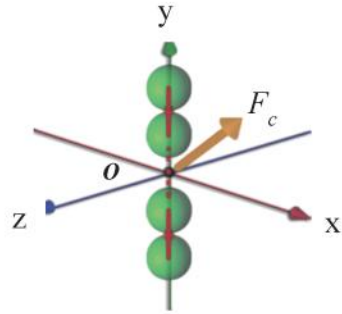


図9 海藻のちぎれ

VIDIA-PhysX (2012)」では, ジョイントに働く外力とトルクの限界値を設定できる。限界値を外力が超過した場合に, ジョイントの接続機能を停止させ, 接合部の破壊を実現する。この機能を用いて植物のちぎれの物理性質をモデリングする。ちぎれの判定式を(1)式の閾値  $J$  により行う。

$$J = \begin{cases} \text{True} : |F| > F_c \text{ or } T > T_c \\ \text{False} : \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

$F, F_c$  はジョイントに加わる外力とその限界値,  $T, T_c$  はジョイントに加わるトルクとその限界値である。外力及びトルクは3次元ベクトルであり, 判定には外力とトルクの絶対値を用いる。ちぎれの概念図を図9に示す。

### 4-3 水中環境の物理モデル

物理エンジンがサポートしているのは重力や摩擦係数など基礎的な物理パラメータのみであり, 水中での流体からの影響力などを考慮したより現実的な物理環境を構築する必要がある。本章では根を固定しない海藻を水流によって流動させるために, 流れの生じる水中環境の構築方法について述べる

**浮力** 物体周囲の流体の密度と物体の密度差が生じる場合, その密度差に応じた浮力が物体に働く。浮力はアルキメデスの原理により, 図10(a)に示すように水中の



物体の中心に流体の密度に比例した鉛直上向きの力として働く．その大きさ  $F_B$  は(9)式により計算される．

$$F_B = \rho V g \quad (9)$$

ここで  $\rho$  は液体の密度,  $V$  は物体の体積,  $g$  は重力加速度である．

**抗力** 流れが生じる流体中を物体が移動するとき, 物体は流体から抵抗力を受ける「松尾一泰 (2007)」．これは流体が粘性を有していることに起因している．流体中における物体に働く抗力は, 物体周囲の流体速度と移動ベクトルとの相対ベクトルの2乗に比例する力として計算され, その向きは物体の進行方向の逆向きである．抗力  $F_D$  とするとその大きさは(10)式により求められる．

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho A v^2 \quad (10)$$

抗力の概念図を図 10 (b)に示す

**流れ場** 流体の速度場を計算するためには想定する流体の特性に応じた流体運動の解析が必要となる．本研究では, 格子ボルツマン法(Lattice Boltzmann method, LBM)「CHEN S. and DOOLEN G.D. (2003)」「KOSHIZUKA S. and OYA Y. (1996)」「LEONARD A. “Vortex methods for flow simulation”, (1980)」「MONAGHAM J.J. (1992)」を採用する．海藻の場として LBM を適用する方法については「古川正志他 (2015)」で報告したので, ここではその概略を述べる．

LBM は空間を規則的な格子で一様に分割・離散化し, 格子内に定めた一定数の粒子運動に基づいて, 連続体としての流体運動をシミュレートする．各格子内には, 複数の粒子速度を定める．15 速度モデルの場合, 図 11 に示すように, 格子内の粒子速度( $\mathbf{c}_i; i=1,2,\dots,15$ )をと設定する．

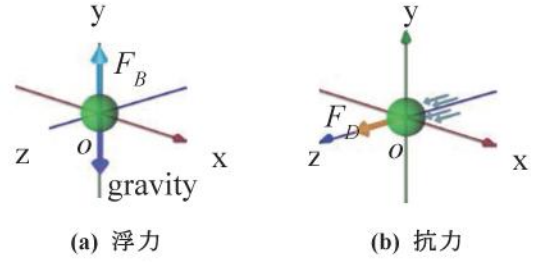


図 10 浮力と抗力

$$\mathbf{c}_i = \{(1,0,0), (\pm 1,0,0), (0,\pm 1,0), (0,0,\pm 1), (\pm 1,\pm 1,\pm 1)\} \quad (11)$$

座標  $\mathbf{x}$  及び時間  $t$  における速度  $\mathbf{c}_i$  をもつ仮想粒子の速度分布関数  $f_i(\mathbf{x}, t)$  は, 以下となる．

$$f_i(\mathbf{x} + \mathbf{c}_i \Delta t, t + \Delta t) = \frac{\lambda - 1}{\lambda} f_i(\mathbf{x}, t) + \frac{1}{\lambda} f_i^{eq}(\mathbf{x}, t) \quad (12)$$

ここで,  $f_i$  は  $i$  方向の粒子における実数値の粒子分布,  $\lambda$  は単一時間緩和係数であり, 衝突を繰り返し移動する粒子は一定割合で平衡状態  $f_i^{eq}$  へと収束する．  $f_i^{eq}$  は以下の(13)式で表現される．

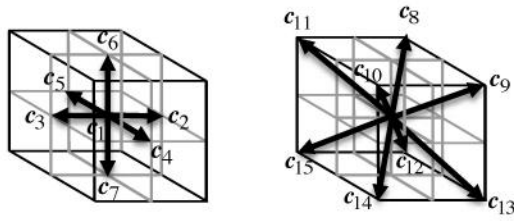
$$f_i^{eq}(\mathbf{x}, t) = E_i \rho \left[ 1 - \frac{3}{2} \mathbf{v}^T \mathbf{v} + 3 \mathbf{c}_i^T \mathbf{v} + \frac{9}{2} (\mathbf{c}_i^T \mathbf{v})^2 \right] \quad (13)$$

但し,

$$E_i = \begin{cases} \frac{2}{9} & : i=1 \\ \frac{1}{9} & : i=1, \dots, 7 \\ \frac{1}{72} & : i=8, \dots, 15 \end{cases}$$

である．(13)式において,  $\rho$  と  $\mathbf{v}$  は格子内の流体の巨視的変数であり, 速度分布関数  $f_i$  を用いて以下の式で定める．

$$\rho = \sum_i f_i \quad (14)$$



(a) 粒子速度  $c_1 \sim c_7$  (b) 粒子速度  $c_8 \sim c_{15}$   
 図 11 15 粒子モデルの格子内の粒子速度

$$v = \frac{1}{\rho} \sum_i c_i f_i \quad (9)$$

## 5 シミュレーション実験

### 5-1 実験目的

成長段階が異なる浮遊性海藻群の挙動及び茎の伸長の違いによる海藻個体同士の物理的干渉をシミュレーションに基づいて検証するために、構築した水中環境に海藻群の物理モデルを配置し水流によって海藻群全体を流動させる物理シミュレーションを実施する。

実験は以下のように行なう。始めに、限界サイクル数 5 の海藻の時系列成長パターンの中から 3 通りを選択する。ついで、これらの 3 通りの海藻成長パターンの物理モデルを作成する。これらを仮想水中環境に設定し、鉛直上向きに発生する噴水流を水中に与え、20 秒間の流動シミュレーションを実施する。このシミュレーションから得られる初期状態からの海藻の挙動の遷移過程を検証する。

成長パターンの選択方法については、海藻の茎の長さや海藻個体の自由度の差が全体の挙動に及ぼす物理的影響を明らかにするために、(1) 初期状態で他海藻と接触していないもの、(2) 成長が進み他海藻との接触が現れる状態のもの、(3) 多くの海藻同士が初期状態から接触しているもの、の 3 種類を選択した。

シミュレーションにおける PhysX の積分 (ルンゲクッタ数値積分) の微小時間は

1/60 秒とした。シミュレーションには 3.4GHz の CPU コアを持つ Intel i7-2600 プロセッサを搭載した計算機を用いた。

表 1 に実験で用いたパラメータの値の詳細を示す。実験に用いる力及びトルクの限界値は、PhysX の物理演算の数値的な安定化のため、予備実験から現実即した挙動が獲得できる適切な値として求めたものを示している。なお、水の密度は  $0.998[\text{g}/\text{cm}^3]$ 、植物の密度は  $1.200[\text{g}/\text{cm}^3]$  とした。海藻は、この密度差により計算の

表 1 実験条件

Plants	
Step size $\sigma$	5
Growth probability $p$	0.8
Range of length $l$	2 - 4 [cm]
Range of rotate angle $\varphi$	-45° - 45°
Range of pitch angle $\theta$	-45° - 45°
Range of yaw angle $\psi$	-45° - 45°
Range of environmental effects	1.0 - 1.5
Radius of growth points	0.5 [cm]
Radius of personal space	1.5 [cm]
Force limit value of joints	1000 [N]
Torque limit value of joints	1000 [Nm]
Initial number of branches	10
Range of number of branches	0 - 2
Number of individuals	50
Density	1.200 [g/cm <sup>3</sup> ]
Water Environment	
Density $\rho$	0.998 [g/cm <sup>3</sup> ]
Gravity acceleration $g$	9.8 [m/s <sup>2</sup> ]
Drag coefficient $Cd$	1
Number of discrete lattices	100×100×100
Relaxation frequency $\lambda$	0.533
Simulation time	20.0[sec]
Time step	1/60.0 [sec]

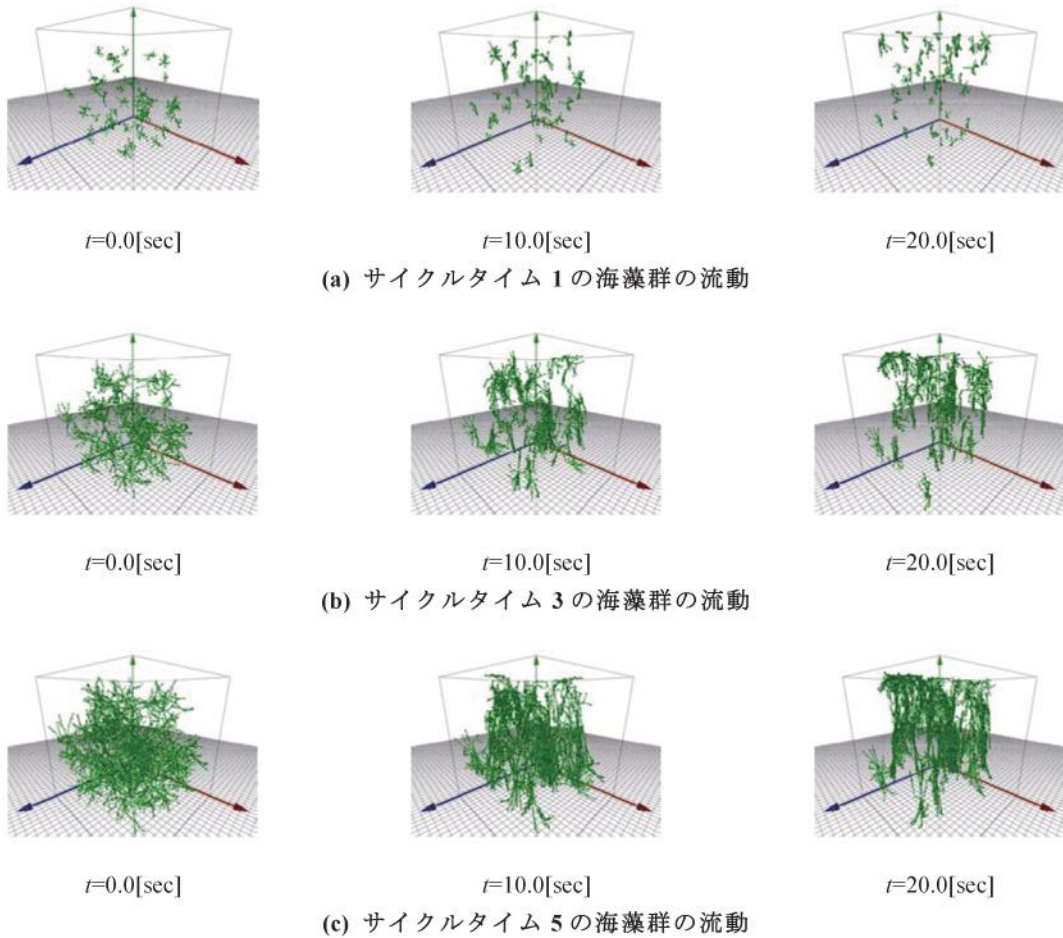


図 12 サイクルタイム 1,3,5 の上下回転噴流による流動シミュレーションスのナップショット

時間進行と共に水中に沈んでいく物体として定義されている。

#### 4-2 結果

初期状態から 10 秒ごとの植物群の挙動遷移の様子を図 12 に示す。初期の成長段階(サイクル数 1)では他海藻との距離が離れており、水流に従い流動するにつれて他個体と接触するが、それらはすぐに分離して、海藻の挙動が他海藻の挙動に与える物理的影響については観測されなかった。

初期状態から接触が観測される成長段階(サイクル数 3)では局所的にいくつかの個体群が茎によって絡まりながら流動する結果が示された。このことから、初期の成長段階(サイクル数 1)で発生しなかった海藻の絡み得られ、海藻が成長にともなって相互間の物理的相互作用が及ぼす影

響が強くなっていくことがわかる。高密度状態にある段階(サイクル数 5)ではほとんどすべての海藻が茎の絡みあいによりつながり、全体が塊として流動している結果が得られた。

#### 4-3 考察

図 12 の実験結果から成長が進むにつれて枝が他の枝との接触または近接状態となり、流動によって絡みあいなどの物理現象に発展することがシミュレーションから明らかとなった。成長初期(図 12(a))では海藻間の接触では絡みは発生しない。海藻の挙動が海藻群全体の挙動に物理的な影響を及ぼすようになる要因としては、海藻の自由度と茎の長さが関係しており、海藻間の物理的干渉が全体の挙動に大きく作用する成長段階が存在することがわ

かる。また、図 12 に示した 3 通りの成長段階でそれぞれサイズの異なる海藻間の接触により生成される植物群の塊の規模は差があり、海藻のサイズは密集状態における海藻群の全体の挙動を予測する際の指標として取り扱える。

#### 4 結言

本研究では確率モデルを用いた海藻群の時系列成長パターンの生成法を提案し、得られた海藻の形状から物理モデルを作成した。また、流れが生じる水中環境下においてそれらの異なる成長段階における物理シミュレーションを実施し、浮遊性海藻群の挙動を検証した。

本研究は、以下のようにまとめられる。

1. ミナミアオノリを海藻モデルとして、確率的構成モデルによる時系列な形状モデリングの方法を示した。
2. 海藻の形状モデルを物理モデリングに表現する方法を示した。
3. 成長が進むにつれて他海藻への物理的な相互作用が、流動に与える影響を大きくすることをシミュレーションから確認した。
4. 海藻間の物理的な相互作用が絡みへと発展する成長段階が存在することを示した。

本研究では、ミナミアオノリをモデルとした針状の浮遊性海藻群の挙動について報告した。今後は、葉などの表面積の広い形状の植物群の挙動の解析や植物の絡みを解消するような水流の制御方法の提案が挙げられる。

#### 謝辞

本研究は平成 25～27 年度学術研究助成

基金助成金（基盤研究（C））（課題番号 25420206, 人工生命技術による海藻の物理特性シミュレーション法の確立と流動制御）に基づいて実施したものである。ここに謝意を表す。

#### 参考文献

- (1) CHEN S. and DOOLEN G.D. (2003) “Lattice Boltzmann method for fluid flows,” *Annual review of fluid mechanics*, Vol.30, No.1, pp.329
- (2) DEIRBAS M.F., BALAT M. and BALAT H. (2009) “Potential contribution of biomass to the sustainable energy development,” *Energy Conversion and Management*, Vol.50, No.7, pp.1746-1760
- (3) FISSHER J. (1992) “How predict are computer simulation of tree architecture,” *Int. J. Plant Sci.*, Vol. 152, pp132-146
- (4) 古川正志他 (2015) 「バイオマス海藻の流動シミュレーションモデル」北海道情報大学紀要, Vol.27, No.1 (掲載決定)
- (5) HALLE F. AND OLDEMAN R. (1978) “TROPICAL TREES AND FORESTS: AN ARCHITECTURAL ANALYSIS,” *SPRING-VERLAG, NEW YORK*
- (6) JACOB C. (1994) “Genetic L-system programming,” *Parallel Problem Solving from Nature-PPSN III*, pp.333-343
- (7) KANG M. Z., COUNEDE P.H., DE REFFYE P., AUCLAIR D. and HU B-G. (2008) “Analytical study of a stochastic plant growth model Application to the Greenlab model”, *Mathematics and Computers in Simulation*, Vol.78, No.1, pp.57-75
- (8) KHESHGI H.S. and PRINCE R.C. and

- MARLAND G. (2000) “The Potential of Biomass Fuels in The Context of Global Climate Change Focus on Transportation Fuels 1,” *Annual review of energy and the environment*, Vol.25, No.1, pp.199-244
- (9) KOSHIZUKA S. and OYA Y. (1996) “Moving-particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid,” *Nuclear science and engineering*, Vol. 123, No.3, pp.421-434
- (10) LEONARD A. “Vortex methods for flow simulation”, (1980) *Journal of Computational Physics*, Vol.37, No.3, pp.289-335
- (11) MATSUMOTO M. and YOSHIDA E. and TAKEYAMA H. and MATSUNAGA T. (2000) “Floating cultivation of marine cyanobacteria using coal fly ash,” *Applied biochemistry and biotechnology*, Vol.84, No.1, pp.51-57
- (12) MONAGHAM J.J. (1992) “Smoothed particle hydrodynamics,” *Annual review of astronomy and astrophysics*, Vol.30, pp.543-574
- (13) 松尾 泰 (2007)「流体の力学 - 水力学と粘性・完全流体力学の基礎,」理工学
- (14) NVIDIA-PhysX (2012) [http://www.nvidia.co.jp/object/physx\\_new\\_jp.html](http://www.nvidia.co.jp/object/physx_new_jp.html), accessed 2012/10/09
- (15) PRUSINKIEWICHZ P. and LINDENMAYER A. (1991) “The algorithmic beauty of plants (*The Virtual Laboratory*)”
- (16) 竹中工務店 (株)「平成 24 年度二酸化炭素海洋固定化・有効利用技術調査事業報告書」, 平成 25 年 2 月 28 日, pp.74-83
- (17) 渡邊信 (2010)「藻類バイオマスエネルギー技術の課題と展望,」日本機械学会誌, Vol. 113, No. 1098, pp.32-35